

J-PARC 高運動量ビームラインにおける
 Λ p 散乱実験に向けた FPGA アクセラレータの開発

東北大学理学部物理学科

梶川 俊介

平成 31 年

目次

1	はじめに	2
1.1	YN 相互作用の必要性	2
1.2	これまでの YN 相互作用の理解	3
1.3	J-PARC 高運動量ビームラインにおける高統計な Λ_p 散乱実験	4
1.3.1	J-PARC 高運動量ビームライン	4
1.3.2	Λ_p 散乱実験	4
1.4	Streaming DAQ system	6
1.4.1	Fiber tracker	7
1.4.2	MPPC	9
1.4.3	NIM-EAIROC	9
1.4.4	HUL	10
1.5	Hardware accelerator	10
1.5.1	Time walk corrector	11
1.5.2	TOT filter	12
1.6	本研究の目的	13
2	β 線源を用いた time walk corrector の作成	14
2.1	実験のセットアップ	14
2.2	分割区間の決定と time walk corrector の作成	14
3	ELPH におけるテスト実験	18
3.1	ELPH とは	18
3.2	実験のセットアップ	18
3.3	Time walk corrector の補正值の決定	19
3.4	Time walk によるコインシデンス窓幅の改善	19
3.5	TOT filter の efficiency, cluster size への影響	21
3.6	Time walk corrector, TOT filter の組み合わせ	24
4	まとめ	27
5	謝辞	28

1 はじめに

1.1 YN 相互作用の必要性

現代物理学において最も重要な課題の1つとして、核力の起源の解明があげられる。核力の期限の1つとして、湯川の間接子論 [1] があげられる。これは、電磁気力が光子の交換に起因することと同様に、核力もまた粒子の交換に起因するという理論である。この粒子を中間子と呼び、核力の到達距離から、中間子が0でない有限の質量を持つことが確かめられている。核力の核子間距離 r への依存性を考えると、図1のように r の値で分けて考えることができる。遠距離では、核力が1個の π 中間子の交換に起因するという描像で説明ができる。中距離では、複数個の π 中間子、 ρ 中間子、 ω 中間子、および σ 中間子といった π 中間子より重い中間子の交換によって核力を表すことができる。しかしながら、核子同士が重なり合ってしまうような近距離においては、今までの中間子交換描像では斥力芯をうまく説明できず、実験と矛盾してしまう。

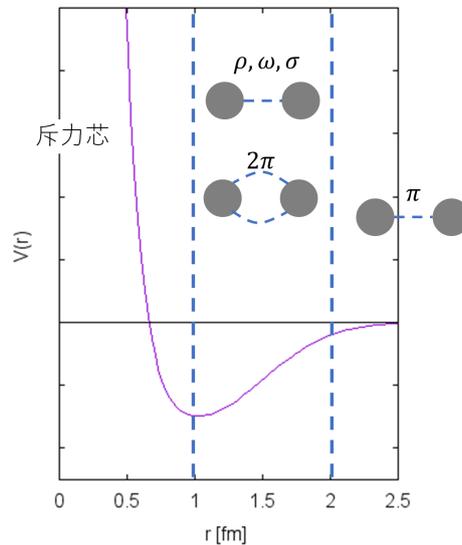


図 1: 核力の模式図 核力は、遠距離では1個の π 中間子の交換で、中距離では、複数個の π 中間子、 ρ 中間子、 ω 中間子、および σ 中間子といった π 中間子より重い中間子の交換によって説明される。核子同士が重なり合ってしまうような近距離においては斥力芯が現れるが、これは中間子交換描像ではうまく説明できない。

この問題の解決のための手段の1つとして、クォークの自由度を考慮した模型を用いるというものがある。この模型を用いることで現れるクォーク間のパウリ効果などによって、近距離における核力の性質を説明できるのではないかと考えられる。この模型を調べるためには、 s quark を導入する、すなわち、ハイペロンを加えた系を考えることが重要である。通常物質はどれも核子から構成されており、 u quark と d quark の SU(2) フレーバー対称性の下で成り立っている。そこに s quark を加えた場合を考えると、これら3種類の構成子クォークの質量はそれぞれ約 300 MeV、約 300 MeV、約 450 MeV と、近い値になっている。そのため、これらの間には SU(3) フレーバー対称性が成り立っているとみなせる。この対称性によって現れる、SU(2) フレーバー対称性の下では見られなかった新

しいチャンネルを調べることで、物理描像を伴った一般的なバリオン間相互作用を作り上げるのが、核子-ハイペロン間相互作用の理解の動機である。この相互作用は、核子を表す N とハイペロンを表す Y を用いて、 YN 相互作用と表される。

1.2 これまでの YN 相互作用の理解

YN 相互作用を調べる際にどのハイペロンと核子の間の相互作用を調べるかが重要となる。まず、ハイペロンの作りやすさを考えると、 s quark は通常物質には含まれないため、 $s\bar{s}$ の対生成によって s quark を生成させなければいけない。そのため、 s quark を 2 個含む Ξ 粒子よりも、 s quark を 1 個しか含まない Λ 粒子、 Σ 粒子の方が作成しやすく、 YN 相互作用を調べるのに都合がいい。また、 Λ 粒子、 Σ 粒子と核子の相互作用を考えると、 Λ 粒子では引力的に、 Σ 粒子では斥力的になる。そのため、この 2 種類のハイペロンの中では Λ 粒子のみが原子核と束縛し、核子多体系を作り出す。そこで、 YN 相互作用の中でも、特に ΛN 相互作用について最初に考える。

2 体相互作用の理解には直接散乱実験を行うことが最も効率的である。しかしながら、 Λ 粒子の寿命は 2.63×10^{-10} s と非常に短いため [2]、 Λ 粒子標的を作ることや、散乱した Λ 粒子をカウンターで測定することはとても困難になる。

過去には、散乱された Λ の測定に関する問題を、バブルチェンバーを用いて反応点を含む全体を測定することで解決した実験が行われている [3, 4, 5]。しかしながら、バブルチェンバーで画像として測定、解析を行うため統計数を増やすことが困難である点と、測定できる Λ 粒子の運動量が小さいものに限られる点とが問題点となる。そのため、これらの実験では統計数が数百イベントと制限されている。

そのため、これまでの ΛN 相互作用の理解においては、主に Λ ハイパー核分光が用いられた。 Λ ハイパー核分光で、 Λ 粒子の束縛エネルギーや Λ ハイパー核のエネルギー準位等を測定するとによって、原子核という多体系内における、 Λ 粒子と核子の相互作用を調べることができる。

このように ΛN 相互作用の理解は、バブルチェンバーを用いた Λp 散乱のデータにより初期の ΛN の 2 体間力が構築され、それを Λ ハイパー核分光の結果を用いてさらに詳細に調べる、といったように、2 つの方法で互いに補うようにしながら行われてきた。現在ハイパー核分光を用いた実験では高い精度で測定ができているものの、 Λ と N の 2 体相互作用は ΛN 散乱実験の統計数の少なさにより p 波以上の部分波はよく分かっていない。また、ハイパー核の構造から ΛN 相互作用を求める核構造計算は困難で不定性が残ってしまうことより、ハイパー核の構造からでは ΛN の 2 体相互作用の p 波以上の部分波を決めることができない。2 体の ΛN 相互作用の精度が足りないことは、 ΛNN といった多体間力を調べる上で問題となる。そこで我々は、2 体の ΛN 相互作用を高い精度で測定するために、現在建設中の J-PARC 高運動量ビームラインで、高統計な Λp 散乱実験を計画している。

1.3 J-PARC 高運動量ビームラインにおける高統計な Λp 散乱実験

1.3.1 J-PARC 高運動量ビームライン

J-PARC は東海村に存在する大強度陽子加速器施設で、400 MeV 直線加速器 (LINAC)、3 GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、50 GeV 陽子シンクロトロン (MR) の 3 台の加速器から成る。ハドロンホールは、MR から得られた陽子ビームを二次粒子生成標的である T1 生成標的に当てて作られた 2 次ビームを用いた実験を行う施設である。J-PARC 高運動量ビームラインは、J-PARC ハドロンホール内に建設されている高運動量・大強度の二次粒子ビームを利用できる新しいビームラインである。高運動量ビームラインは図 2 の水色の矢印で表されたビームラインであり、オレンジ色の矢印で示された既存のビームラインの T1 生成標的よりさらに上流に新しく T0 生成標的を設置し、そこから得られる π^- 、 K^- 、および \bar{p} といった二次粒子ビームを用いて実験を行う。J-PARC ハドロンホールでは加速された粒子を 1 spill = 2 s の長さの連続ビームとして利用しており、この時得られるビームは、運動量が最大で 20 GeV/c、ビームレートは 60 M/spill である。また、高運動量ビームラインではビームの運動量が高いためにマススリット等を設置して粒子を選別することが困難であるため、様々な二次粒子ビームがそのまま標的まで到達する。

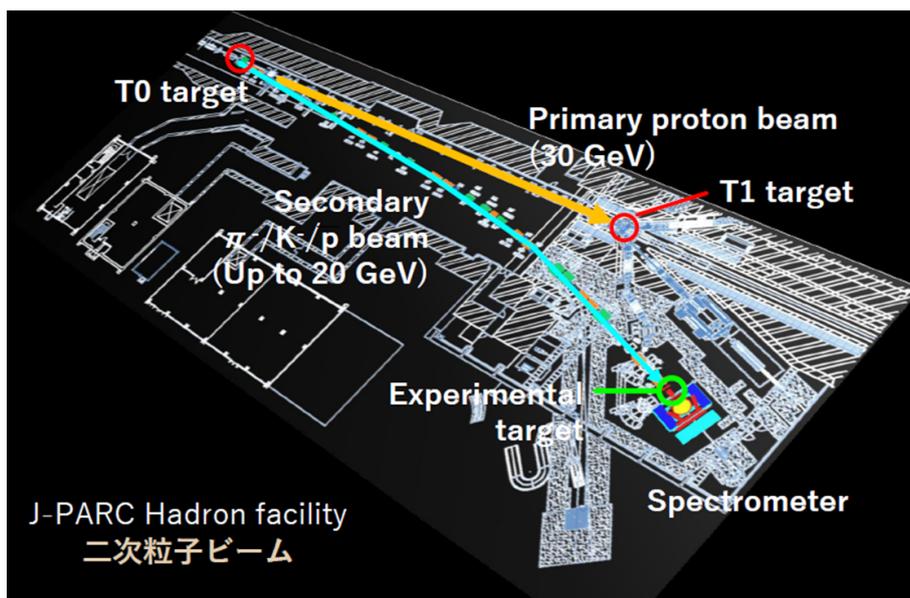


図 2: J-PARC ハドロンホールの概観 50GeV 陽子シンクロトロンから得られたビームを生成標的に照射し、そこから得られる二次粒子ビームを用いる実験施設である。オレンジ色の矢印で表される既存のビームライン用の T1 生成標的の上流に新しく T0 生成標的を設置し、そこから得られる π^- や K^- 、 \bar{p} といった二次粒子ビームを用いて実験を行う高運動量ビームラインが水色の矢印の位置に建設されている。

1.3.2 Λp 散乱実験

我々はこの高運動量ビームラインにおいて高統計な Λp 散乱実験を計画している。この実験では、 π^- ビームを液体水素標的に照射して Λ を生成し、生成された Λ が水素標的中

の陽子と再びと衝突する事象の測定を行う。

本実験では、高運動量の π^- を用いることで、図3の Λ の生成に K^{*0} の生成が伴う Λp 散乱を利用することができる。この反応を用いるメリットは、 Λ の生成をバックグラウンドフリーで識別できることである。液体水素標的を用いた Λ の生成反応では必ず中性メソンが作られるが、これは直接測定できないため、その崩壊によって生じた粒子を測る必要がある。低運動量で生じる Λp 散乱の反応過程では、生じる中性メソン K^0 の崩壊によって π^+ 、 π^- が生じるが、 π^\pm はほかにも多くの反応で作られるため、 Λ をバックグラウンドフリーで検出することが難しい。しかしながら、図3の反応では、生じる中性メソン K^{*0} は π^- と K^+ に崩壊する。このうち、 K^+ は、 \bar{s} を含むため、 s が生成されたということをタグすることができる。そのため、 Λ の生成をバックグラウンドフリーで識別できる。

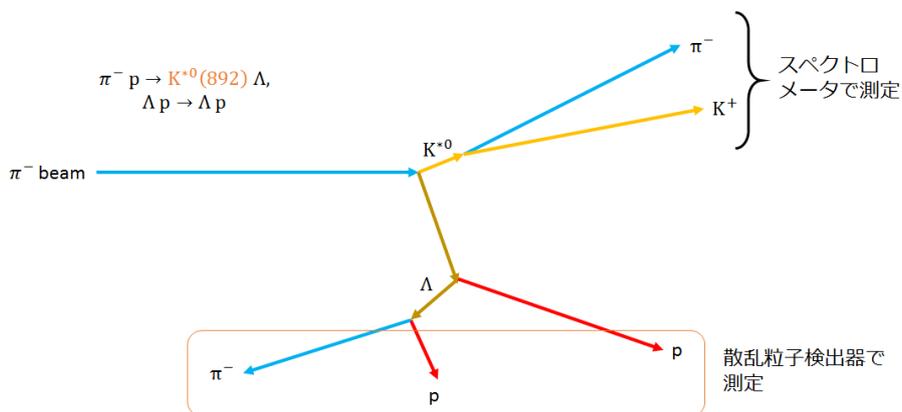


図 3: 本実験で利用する反応過程 π^- ビームを液体水素標的に照射し、それによって生じる Λ と p の散乱を測定する。この際に伴って生じる中性メソン K^{*0} の崩壊で π^- と K^+ が生じる。このうち、 K^+ は \bar{s} を含んでいる。

生成された粒子の検出には、図4のような高性能の汎用スペクトロメータを用いることが計画されている。液体水素標的上流に設置した検出器でビーム粒子の識別や位置の測定を行う。 Λ 生成に伴って生じたメソンである π^- と K^+ は FM 磁石と下流に設置した検出器で測定する。生成された Λ やそれと散乱した p は標的周辺の検出器で測定する。このスペクトロメータは測定可能な運動量範囲が $0.2 \text{ GeV}/c$ から $16 \text{ GeV}/c$ と広いため、様々な反応を測定することが可能である。

本実験では、 π^- ビームの運動量として、 $5 \text{ GeV}/c \sim 10 \text{ GeV}/c$ を考えている。この運動量を用いる理由は、反応において K^{*0} が作られやすく、生成後の Λ やそれと散乱した p が標的周りの検出器で検出されやすいという利点があるためである。

本実験の遂行において、克服すべき大きな課題が存在する。それは、高運動量・大強度の二次ビームと高性能の汎用スペクトロメータを用いるため、高レート・多種多様なイベントが観測されてしまうことである。これまでは、検出器の信号からハードウェアを用いてトリガーを作り、そのトリガーに基づいてデータの取得と処理、および保存を行う DAQ システムと呼ばれるシステムを用いてデータの収集を行ってきた。しかしながら本実験では、要求されるトリガーレートが 10 kHz 程度であるのに対して、反応レートはおよそ 2 MHz と非常に大きな値である。これを、要求トリガーレートまで抑えることを考えると、信号のコインシデンスといった単純なものでは到底足りず、運動量解析といった高度な物理的

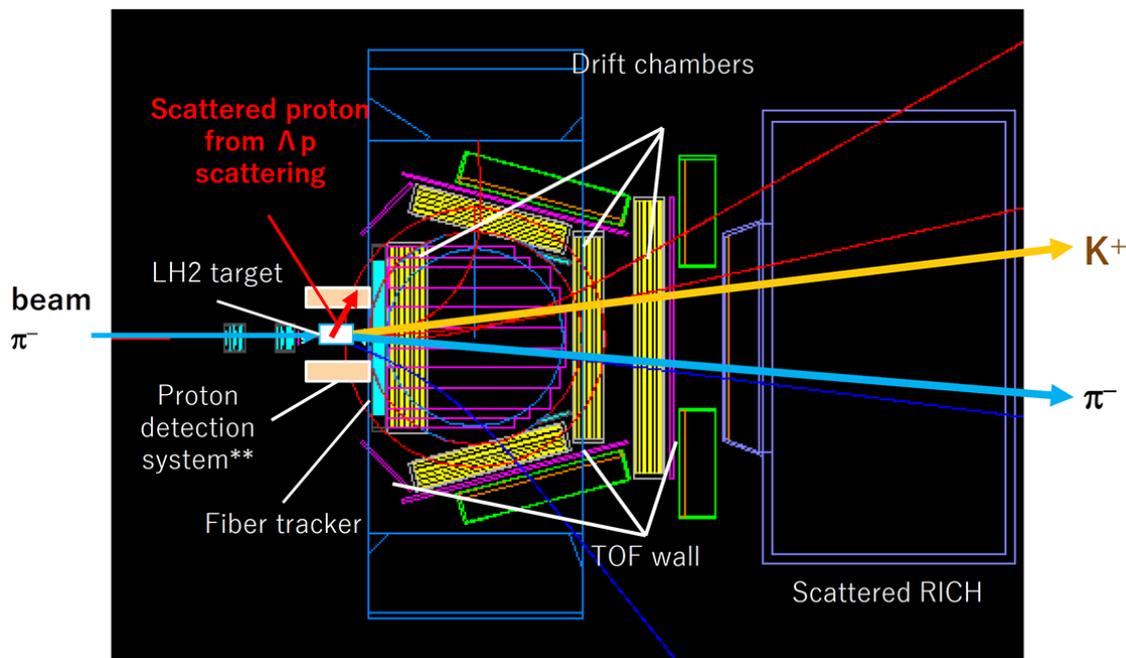


図 4: 高統計 Λp 散乱実験用のスペクトロメータ 液体水素標的上流に設置した検出器でビーム粒子の識別や位置の測定を行い、FM 磁石と下流に設置した検出器で Λ 生成に伴って生じたメソンである π^- と K^+ の測定を行う。

な計算が必要になる。しかしながら、運動量解析を電子回路で行いトリガーを生成するのは非常に困難であるため、既存の DAQ システムでは実験が破綻してしまう。

1.4 Streaming DAQ system

前節でも述べたように、J-PARC 高運動量ビームラインで計画されている高統計な Λp 散乱実験では、イベントレートが高すぎるためハードウェアを用いて十分な質のトリガーを作成することができず、既存の DAQ システムではデータの収集を円滑に行うことができない。そこで、このような状況を打破するために、streaming DAQ system の導入が求められている。

Streaming DAQ system は、検出器の信号全てをいったんコンピュータに取り込み、コンピュータ上でイベントの選別を行うデータ収集系である。このシステムは、粒子を検出する検出器、検出器からの信号をコンピュータで扱えるデジタル信号に変換する front-end electronics、および変換されたデジタル信号の処理・保存を行うコンピュータから成り立っている。Front-end electronics では、まず、検出器から得られたアナログ信号をディスクリミネータを用いてタイミング信号へ変換する。そうして得られたタイミング信号から、streaming TDC を用いて時間情報を取得しデジタル信号化する。最後に、得られたデジタル信号のコンピュータへの転送を行っている。

本 DAQ system で用いる streaming TDC の模式図を図 5 に示す。この streaming TDC はデジタル回路であり、FPGA と呼ばれるハードウェア言語によって自由に回路を書き込むことができるデバイス上に搭載される。Streaming TDC では、まず、TDC unit で信

号の立ち上りである leading と立ち下がりである trailing の時間情報が独立に取得される。その後、pairing unit でこれらの信号をペアにして、電圧のしきい値を超えた時間である TOT(time over threshold) を計算する。これらの信号はその後、コンピュータでのイベントの選別の際に CPU にかかる負荷を減らすために hardware accelerator によって補正が加えられる。ここまで各検出器ごとに並列処理されていた信号は、data merging block によってシリアル処理にまとめられる。そして、heart beat unit において、これらの信号の中に、heart beat 信号が追加される。Heart beat 信号は 16bit のカウンターが 1 周するごとに作られる。最終的に得られたデジタル信号は SiTCP サイトを通してコンピュータに転送される。

Streaming TDC 上での一連の流れにおいて、data merging block 以前では各検出器からの信号を並列に処理しているため、それぞれのプロセスでかかる時間は、どの検出器からの信号も同じ時間になるようにそろえる必要がある。一方で、data merging 以降の信号の転送を行う部分ではかかる時間が可変であるが、heart beat 信号はどの検出器にも同時に送られているため、heart beat 信号の個数とそこからの時間を用いることで、信号の時間情報を正しく得ることができる。

また、この streaming TDC における 0.96 ns の時間精度は次のように得る。TDC 全体を同期する 130MHz のベースクロックを逡倍して位相の 90° ずつ異なる 4 つのクロックを用いることで、1 bit = 0.96 ns の精度で時間情報を得ることができる。

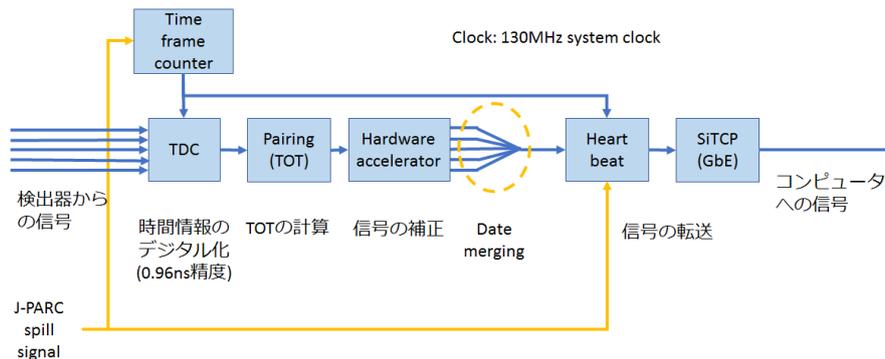


図 5: Streaming TDC の模式図 まず、TDC unit で信号の立ち上りである leading と立ち下がりである trailing の時間情報を独立に取得し、pairing unit でこれらの値から TOT を計算する。その後、hardware accelerator で信号に補正を加え、data merging block で各検出器からの信号を並列処理からシリアル処理にまとめる。Heart beat unit でこれらの信号に heart beat 信号を加え、最終的に得られたデジタル信号を SiTCP サイトを通してコンピュータに転送する。

1.4.1 Fiber tracker

本研究では、試作 beam fiber tracker と呼ばれるファイバートラッカーを streaming DAQ のデータソースとして用いた。以後、試作 BFT と呼ぶこととする。試作 BFT は X、U、V 構造を有し、X 面、U 面、V 面の組が 4 組の合計 12 面から構成される。各面は図 6 のように、X 面は鉛直方向と一致するように設置されており、U 面、V 面はビーム上流側から見た時に、それぞれ X 面に対して右に 30°、左に 30° 傾いた方向に設置されている。X

面、U面、V面の配置は、ビーム上流側の6面では上流から順にXUVの順に並んだ組が2つ並び、ビーム下流側の6面では上流から順にUVXの順に並んだ組が2つ並ぶ形になっている。また、各面の構造は図7のように、シンチレーションファイバーの2層俵積み構造になっている。各面の端には信号の得られない dummy fiber が配置されており、それを除いたファイバー数はX面が6本2層、U面、V面が5本2層になっており、試作BFTから得られる信号は12面合計で128chになる。

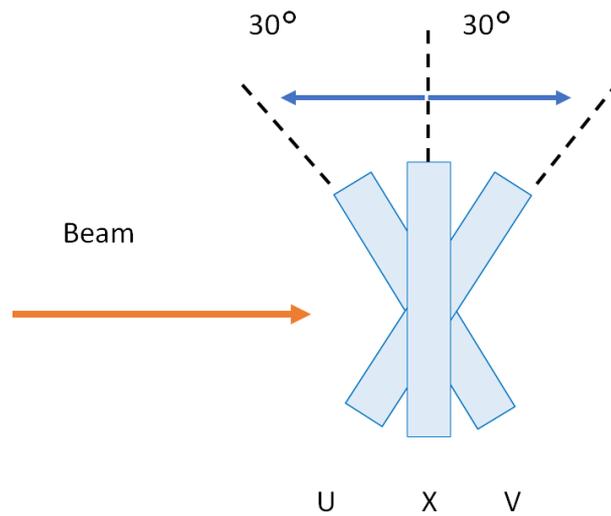


図 6: 試作 BFT の各面の配置の模式図 X 面は鉛直方向と一致するように設置されており、U 面、V 面はビーム上流側から見た時に、それぞれ X 面に対して右に 30° 、左に 30° 傾いた方向に設置されている。

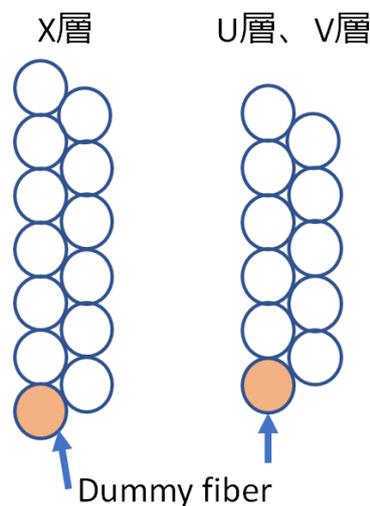


図 7: 試作 BFT の各面のファイバーの配置の模式図 各面の構造はシンチレーションファイバーの2層俵積み構造になっている。各面の端には信号の得られない dummy fiber が配置されており、それを除いたファイバー数はX面が6本が2層、U面、V面が5本2層になっている。

1.4.2 MPPC

荷電粒子が試作 BFT のシンチレーションファイバーに照射されると、各ファイバーでシンチレーション光が生じる。その測定には、ADP と呼ばれるダイオードの 1 種を並べた光検出器である MPPC が用いられる [7]。ADP は pn 接合されたダイオードで、MPPC においては、ガイガーモードと呼ばれる降伏電圧よりも大きな逆電圧をかけた状態で用いられる [6]。逆電圧によって生じた空乏層に光子が入射すると、電子-正孔対が生成される。生成された電子は、逆電圧による電場によって加速され、電子雪崩を引き起こし、それが N^+ 極で信号として観測される。MPPC で用いる ADP では十分に大きな逆電圧がかかっているため、電子雪崩によって増幅された電子数が飽和しており、素子固有の飽和出力が得られる。MPPC の出力は各 ADP からの出力の足し合わせとなるため、MPPC の出力の大きさから、検出された光子数の情報が得られる。

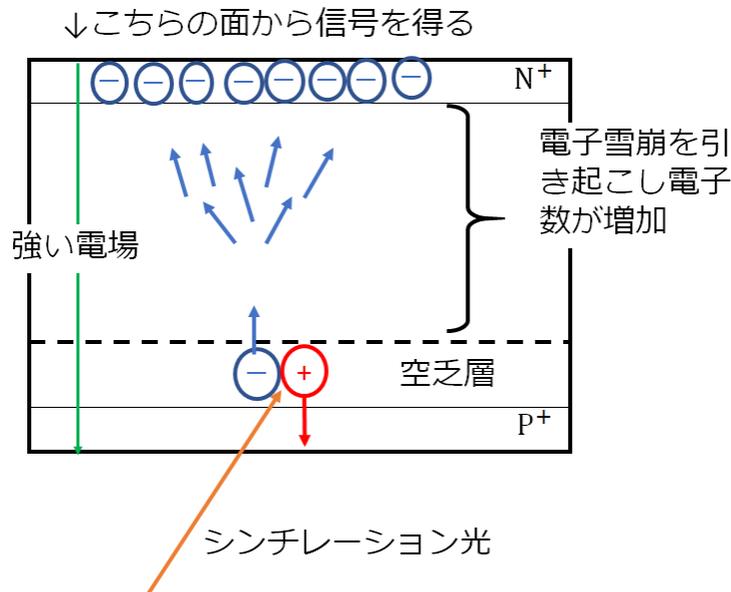


図 8: ADP における光子検出の模式図。ガイガーモードで運用されており、素子固有の飽和出力が N^+ 極に信号として出力される。

1.4.3 NIM-EASIROC

NIM-EASIROC は NIM ビンに搭載可能な汎用 MPPC 読み出しモジュールであり、図 9 のような構造をしている。EASIROC によって取得された MPPC の信号は、FPGA 内の TDC でロジック信号に変換される。その後、SiTCP を通って出力される。EASIROC の制御は SiTCP を通して、Linux 上のソフトウェアから行える。本研究では、試作 BFT の MPPC からの信号の読み出しに用いた。

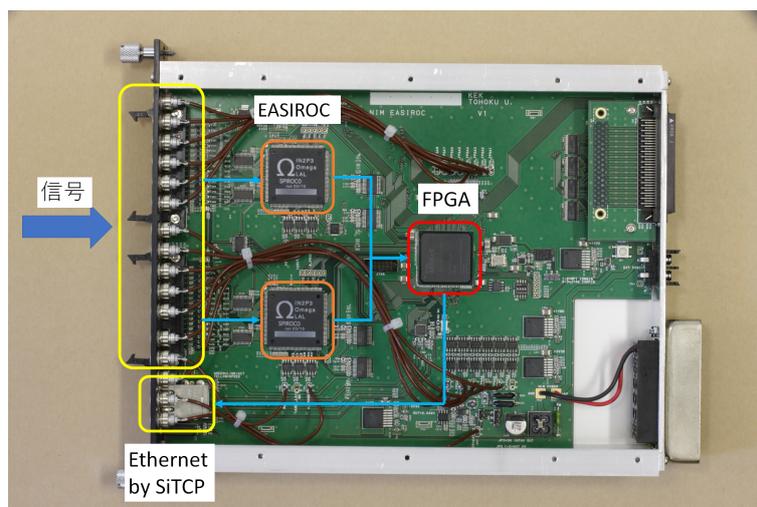


図 9: NIM-EASIROC NIM-EASIROC は NIM ピンに搭載可能な汎用 MPPC 読み出しモジュールである。MPPC から得られた信号は、FPGA 内の TDC を用いてロジック信号に変換された後に、SiTCP サイトを通して出力される。

1.4.4 HUL

HUL は FPGA を搭載したモジュールで、本研究における streaming TDC はこのモジュールの FPGA 上に実装される。Streaming DAQ system においてこのモジュールでは、図 10 のように、入力コネクタからの信号を FPGA に伝え、FPGA に実装された streaming TDC で処理し、SiTCP を通してパソコンへデータを転送する。本研究では合計 6 台の HUL を使用した。これら 6 台の HUL はマスタークロックによって同期されている。

1.5 Hardware accelerator

Streaming DAQ を J-PARC 高運動量ビームラインで用いると、高いイベントレートと検出器からの信号をすべて取り込むという streaming DAQ の仕組みにより、極めて多くのデータが取り込まれる。Streaming DAQ におけるイベントは、複数の検出器が基準となる検出器の周りのある時間範囲内でコインシデンスすることと定義される。そのイベントに含まれる信号を調べる際には、基準となる検出器の周りの一定の時間範囲内を調べることになる。調べる時間範囲が増えると CPU にかかる負担が増えるため、それを減らすために信号に時間分布がなるべく狭くなるように補正を加える必要がある。ところが、補正自体に CPU を使うと、CPU での処理は逐次処理であるために大きな負担がかかってしまう。そこで、並列処理の得意な FPGA を用いてチャンネルごとに並列に処理を行うことで、CPU にかかる負担を減らすことを計画している。この補正を行う機能を hardware accelerator と呼ぶ。

本研究では、信号の time walk を補正する time walk corrector と TOT 分布を用いてデータを選別する TOT filter を hardware accelerator として用いる。

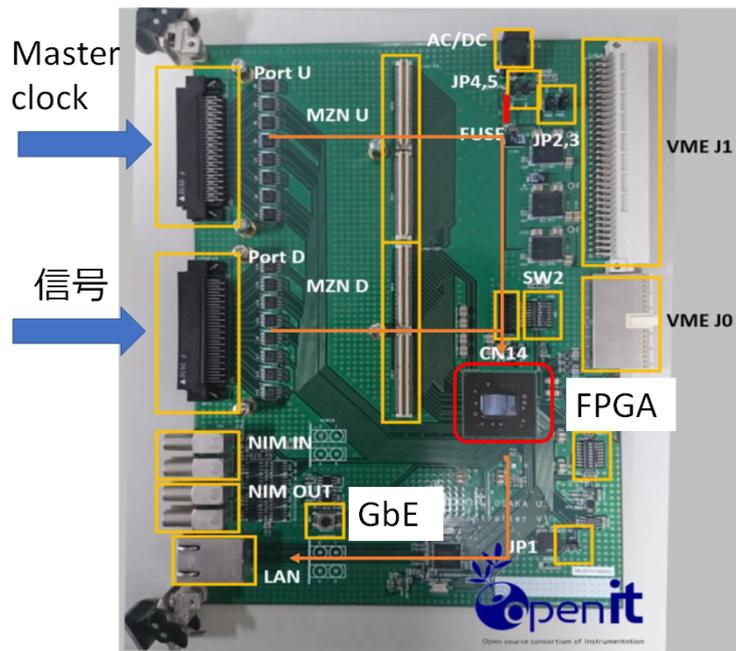


図 10: HUL モジュールにおける処理の流れ 入力コネクタからの信号を FPGA に伝え、FPGA に実装された HUL streaming TDC で処理し、SiTCP サイトを通してパソコンへ信号を転送する。

1.5.1 Time walk corrector

検出器からの信号の時間情報について考えると、たとえ同時に粒子が検出器を通過しても、同時にタイミング信号が得られるとは限らない。その原因には、シンチレーションファイバーの崩壊定数によるものと、time walk によるものの 2 種類が考えられるが、前者は、15 ns 程の違いを生む後者に比べて影響は小さく、time walk がタイミング分布が広がる主要原因になっている。Time walk は図 11 のように、信号の波高によって閾値電圧を超える時間に違いが生じる現象のことである。Time walk による時間の違いは波高の値によって決まる。そして、TOT もまた波高の値によって変化するため、TDC と TOT の値には図 12 のような相関が生まれる。

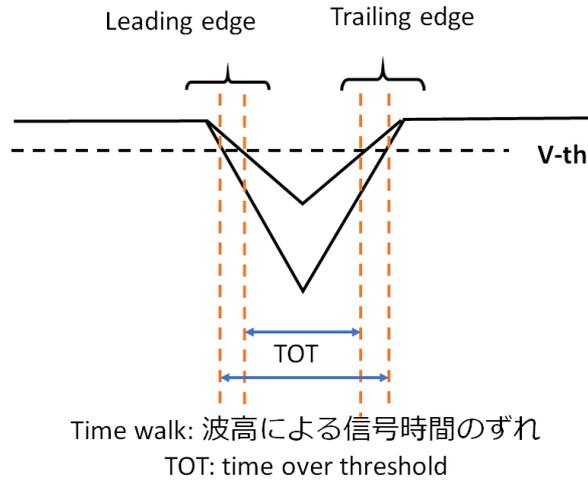


図 11: Time walk の仕組み 粒子が同時に検出器を通過しても、信号の波高の高さによって閾値電圧を超える時間に違いが生じる。これが time walk と呼ばれる現象である。

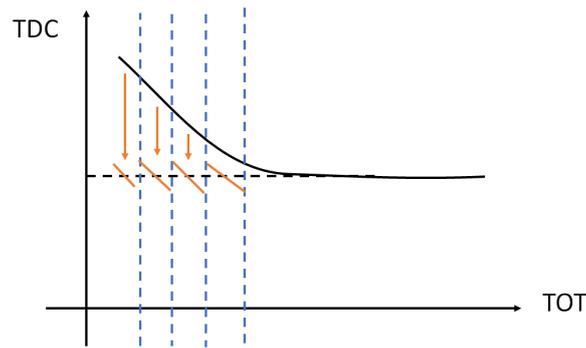


図 12: Time walk の TOT 依存性と time walk corrector の仕組み Time walk による時間情報の違いは、TOT が小さな領域ほど大きくなる。Time walk corrector では、TOT 値で領域を区切って分割し、各領域の TDC 値に固定値の補正を加えることで、time walk に補正を行う。

この time walk corrector による時間の違いを修正するための hardware accelerator が time walk corrector である。FPGA 上で関数のフィッティングといった複雑な計算を行うことは難しいため、time walk corrector では図 12 のように TOT 値で領域を区切って分割し、各領域の TDC 値に固定値の補正を加えることで time walk の補正を行う。この補正値は、実際に time walk を測定して決定した。

1.5.2 TOT filter

検出器の信号には、粒子由来の信号の他にダークカレントなどのノイズも含まれる。ダークカレントは熱などの光子以外の原因によって生じた電子が光電子と同様に増幅されることで生じる信号である。ダークカレントは粒子による信号に比べて波高が小さいため、図 13 のように、TOT の小さな領域に帯状に現れる。そのため、TOT の小さな領域のデー

タを取り除く TOT filter を用いることで、ダークカレントを除去し、データ量を小さくすることができる。この際の注意点として、TOT filter が粒子由来の信号も同時に除去してしまう恐れがある点があげられる。この実験ではこの点についても調査した。

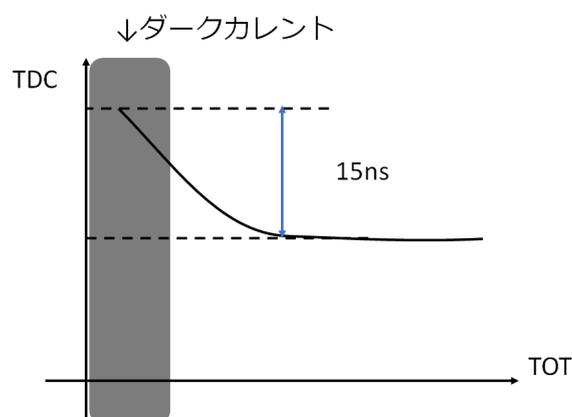


図 13: ダークカレントの分布 ダークカレントは熱的に発生した電子による信号である。ダークカレントは粒子由来の信号に比べて波高が小さく、TOT の小さな領域に帯状に現れる。

1.6 本研究の目的

本研究は、J-PARC 高運動量ビームラインで計画されている Λ_p 散乱実験で導入される streaming DAQ system において、CPU への負荷を減らすために実装される hardware accelerator の設計と性能の評価を行うことが目的である。

Hardware accelerator は、J-PARC 高運動量ビームラインにおける高統計な Λ_p 散乱実験において、streaming DAQ system を用いて測定した際の CPU への負荷を軽減するために実装される。そのため、その際に想定される数 MHz/ch という高いイベントレートにおいても正常に働くことが望ましい。本研究は、 β 線源 (^{90}Sr) を用いて測定された time walk を元に time walk corrector を作成し、それが東北大学電子光理学研究センター (ELPH) で実施したテスト実験における高レートの測定においても正常に機能するか評価することが目的である。

Hardware accelerator は検出器からの信号をコンピュータで取り込む前に補正するという試みである。そのため、個々の hardware accelerator を個別に用いた際は問題なくとも、それを組み合わせて用いた際にはデータが破壊されるといった予期しない動作が起こることも考えられる。そこで、ELPH での高レートのテスト実験のデータを用いて、time walk corrector と TOT filter を組み合わせた際の影響を調べることも、hardware accelerator の性能評価の目的である。

2 β 線源を用いた time walk corrector の作成

前章でも述べたように、time walk corrector は送られてきた信号を TOT 値で領域を区切って分割し、各領域の TDC 値に固定値の補正を加えることで time walk の補正を行う機能である。この補正において各領域内での TDC 値の分布の幅は変化しないため、time walk corrector における領域分割の際には、time walk による時間の違いの影響が特定の領域に偏らないように各領域の範囲を決定する必要がある。本章では、 β 線源 (^{90}Sr) を用いた試作 BFT の time walk の測定と、その測定結果を用いた各領域における TDC 値の分布の幅が等しくなるような TOT 分割の決定、およびその TOT 分割を用いた time walk corrector の作成について述べる。

2.1 実験のセットアップ

本測定で用いた β 線源の強度は弱いため、試作 BFT の XUV 面が重なっている点で測定を行うと β 線が途中で止まってしまい、TDC のトリガーを用意することができない。そこで本測定では図 14 のように配置を行い、 β 線をビーム下流側の X 面 2 面とトリガ用のプラスチックシンチレーターのみにあてて測定を行った。この際、コモンストップ型の TDC を時間測定に使い、プラスチックシンチレーターの光子を検出する PMT の信号をコモンストップとした。また MPPC は、高電圧電源によって 59.0 V の電圧を印加された状態で用いた。

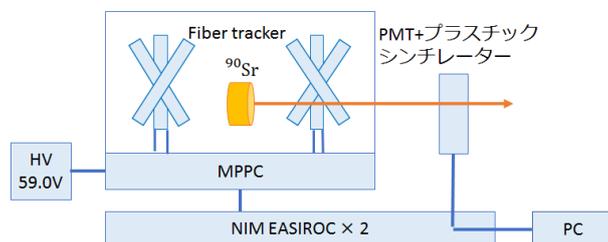


図 14: Time walk 測定のセットアップの模式図 β 線をビーム下流側の X 面 2 面と、トリガ用のプラスチックシンチレーターのみにあてて測定を行った。MPPC の読み出しには NIM-EASIROC を用いた。MPPC は 59.0 V の電圧を印加して用いた。

2.2 分割区間の決定と time walk corrector の作成

β 線に対する TOT と TDC の相関は、図 15 のようになった。ここで、TOT が 11 と 22 の付近に現れた縦の帯上の信号は、MPPC のダークノイズである。TDC 値が 460 から 490 の領域を見ると、TOT 値が小さくなるにつれて TDC 値が小さくなる信号が確認できる。これが β 線由来の信号とその time walk であると思われる。また、TDC が 440 から 450 の領域にも信号が固まっていることが確認できる。これはダブルカウントが生じているのではないかと考えられる。これらの信号以外にも少数ながら信号がみられるが、これはノイズ由来の信号であると考えられる。

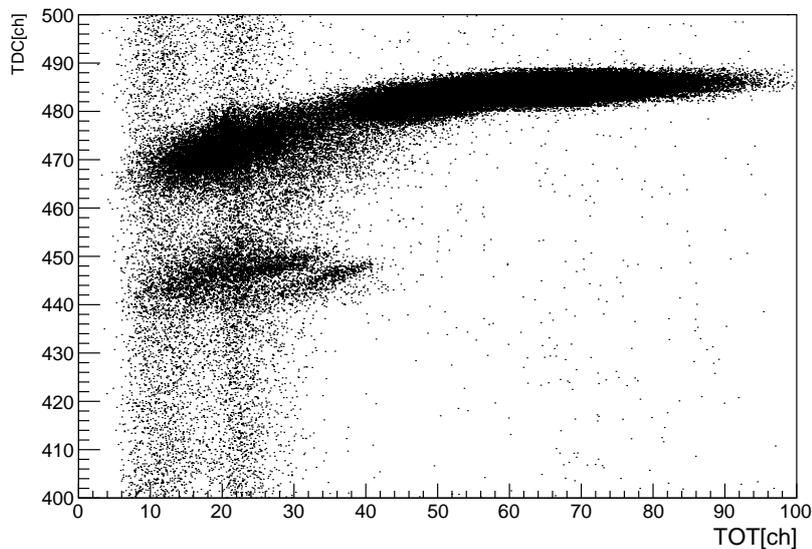


図 15: β 線に対する試作 BFT の TDC と TOT の相関 TDC 値が 460 から 490 の領域を見ると、time walk によって TOT 値が小さくなるにつれて TDC 値が小さくなる。他にも、TOT が 11 と 22 の付近にダークノイズによる信号が、TDC が 440 から 450 の領域にダブルカウントによるものと考えられる信号が存在する。

ノイズの影響を減らすために、TDC 値が 455 以下、または 490 以上の信号を取り除いて二次関数を用いてフィッティングを行ったところ、図 16(a) のようにフィッティングすることができた。また、そのフィッティング結果に基づいて、ほとんど直線になっている TOT が 60 以上の領域を除いた部分に補正を加えたところ、図 16(b) のように time walk による TDC の違いを改善できることが確認できた。



図 16: 試作 BFT の time walk のフィッティング結果 (a) とそれを用いた補正結果 (b) Time walk を二次関数によってフィッティングした結果と、その結果を用いた補正で time walk が改善されることが確認できた。

図 16(b) の結果を再現できるように、time walk corrector の作成を行った。まず、測定したデータから、y 軸に射影した 1 次元ヒストグラムの分布の幅が等しくなるように TOT 分割の範囲を決定した。この時、ガウス関数でフィッティングしたときの σ を射影した 1 次元ヒストグラムの幅とした。分割した各領域での 1 次元ヒストグラムは図 17 のようになり、各領域の範囲と、1 次元ヒストグラムのピークのフィッティングの結果は表 1 のようになった。各領域のピーク的位置から、各領域でのピーク的位置が領域 V でのピーク的位置と一致するように time wlk corrector の補正值を決定した。

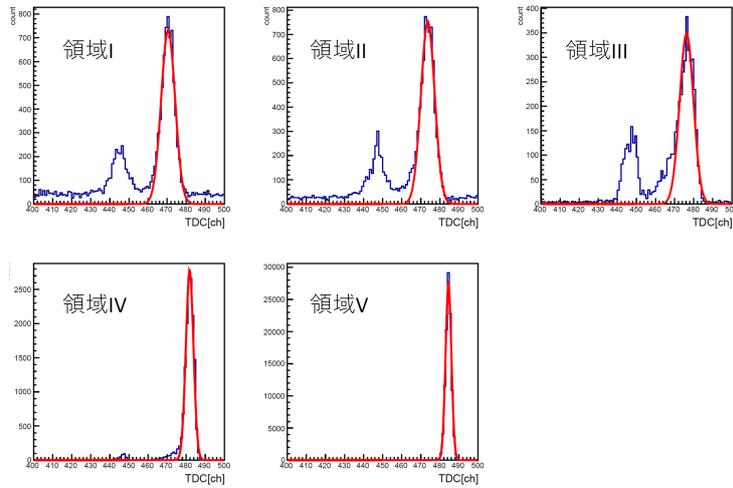


図 17: 各領域における TDC の 1 次元ヒストグラム TOT 分割の範囲を、分割された各領域での TDC 分布の幅が等しくなるように決定した。

表 1: 分割の領域と各領域でのフィッティングの結果 各領域のピーク位置を領域 V のピーク位置に一致させるために必要な値を補正值とした。

	領域 I	領域 II	領域 III	領域 IV	領域 V
領域の範囲	TOT < 20	20 < TOT < 28	28 < TOT < 36	36 < TOT < 50	50 < TOT
分散 σ [ch]	3.64	3.61	3.64	1.98	1.51
ピーク位置 [ch]	470	473	476	481	484
補正值 [ch]	+14	+11	+8	+3	-

各領域での TDC 値に、フィッティングの結果から求めた補正值を加えた。TOT と補正後の TDC の 2 次元ヒストグラムは、図 18 のようになった。図 18 を見ると、領域の境界部分に不連続はあるものの、関数による補正を加えた時と同様に time walk による違いのない TDC の相関になることが確認できた。これは、ハードウェアである time walk corrector を用いて測定した時に見られると予想される TOT と TDC の相関を、コンピュータ上で再現したものがある。また、補正前のデータ、関数による補正後のデータ、および time walk corrector と同様の補正を加えたデータの TDC 値に、それぞれ TDC、TDC'、TDC'' と名前を付け、それらの 1 次元ヒストグラムを同時にプロットしたところ、図 19 のようになった。図 19 を見ると TDC' と TDC'' の両方で、time walk によって生じた、TDC 値が 470 から 480 の範囲の山が見られなくなっていることが確認できた。これらのことより、補正值を適切に選べば、time walk corrector は関数による補正と同程度の効果が見込まれるということがわかった。

この結果をもとに TOT 分割を表 1 に示した領域に決定し、そのように time walk corrector を streaming TDC に実装した。

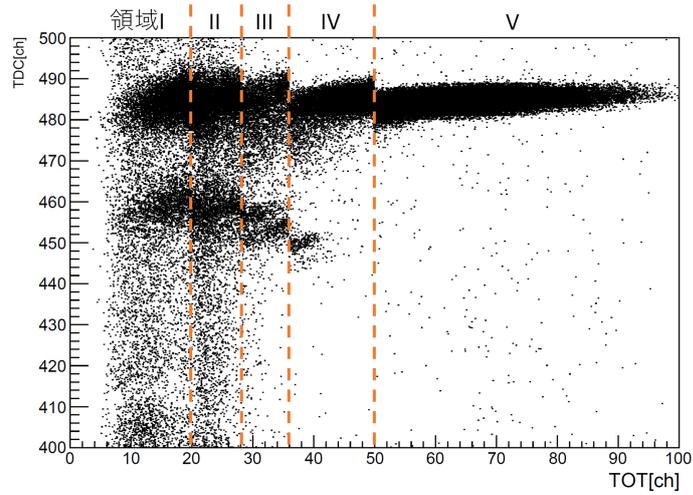


図 18: 補正定数による補正後の TOT と TDC の相関 各領域での TDC 値にフィッティングの結果から求めた補正値を加え、time walk corrector を用いて測定した時に見られると予想される TOT と TDC の相関をコンピュータ上で再現した。

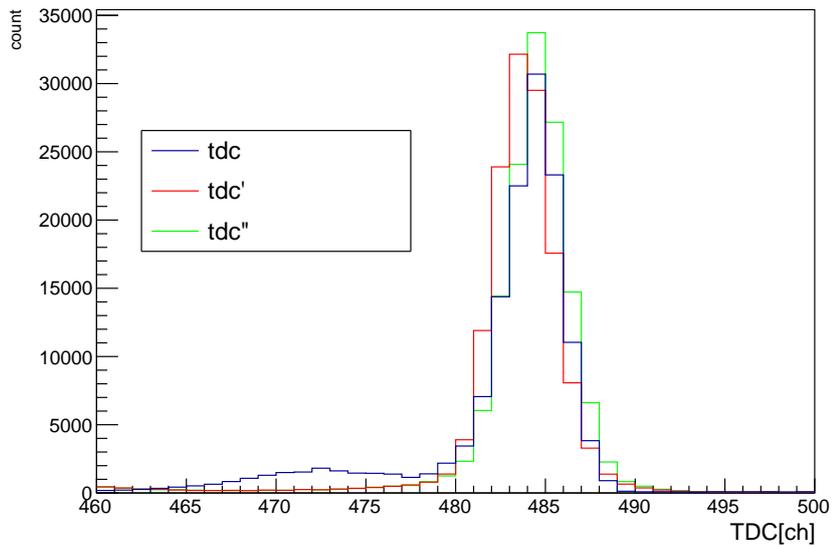


図 19: Time walk 補正前後の TDC の 1 次元ヒストグラム 補正前のデータ、関数による補正後のデータ、および time walk corrector と同様の補正を加えたデータの TDC 値を、それぞれ TDC、TDC'、TDC'' とした。

3 ELPHにおけるテスト実験

この章では、東北大学電子光物理学研究センター、通称 ELPH で行ったテスト実験と、その測定結果を用いた hardware accelerator の性能評価について述べる。

3.1 ELPH とは

ELPH は、大強度電子線形加速器と電子円形加速器である 1.3 GeV BST リングを持つ東北大学の加速器施設でその概観は図 20 のようになる。

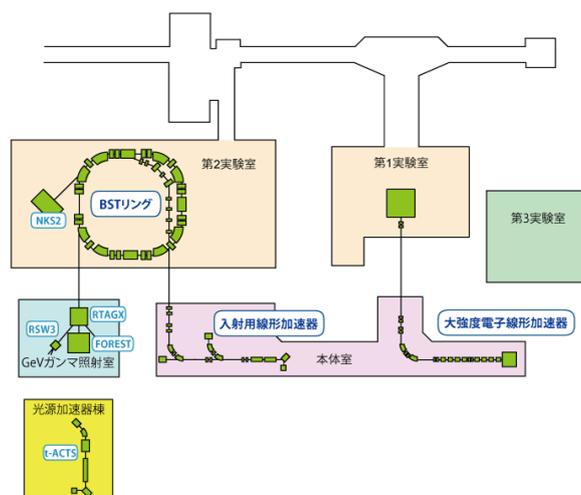


図 20: ELPH の概観 ELPH は、大強度電子線形加速器と電子円形加速器である 1.3 GeV BST リングを持つ東北大学の加速器施設である。

BST リングでは、加速した電子ビームをラジエーターと呼ばれる細い炭素ファイバーに照射することで γ 線を作り出し、それを用いて実験を行う。

3.2 実験のセットアップ

Hardware accelerator の性能評価を、2018 年 12 月の ELPH でのテスト実験の際に実施した。テスト実験は、ELPH 第 2 実験室の BST リングの付近で行い、検出器等は図 21 のように配置した。この実験では、BST リングから制動放射で得られた光子をフランジに取り付けたコンバーターで電子・陽電子対に変換し、それらを試作 BFT やシンチレーション検出器、ドリフトチェンバーで測定した。その測定で得られたアナログ信号は、MPPC からの信号は NIM-EASIROC を用いて、ドリフトチェンバーからの信号は ASD を用いて、そして PMT からの信号はディスクリミネータを用いてタイミング信号に変換した。その後 HUL streaming TDC でタイミング信号から時間情報にデジタル信号化した。この処理には同じクロックによって同期された 6 台の HUL を用いた。その後、SiTCP を通してパソコンにデジタル信号を転送し、データの保存を行った。この測定での、streaming TDC の時間精度は $1\text{ch} = 0.96\text{ns}$ となる。

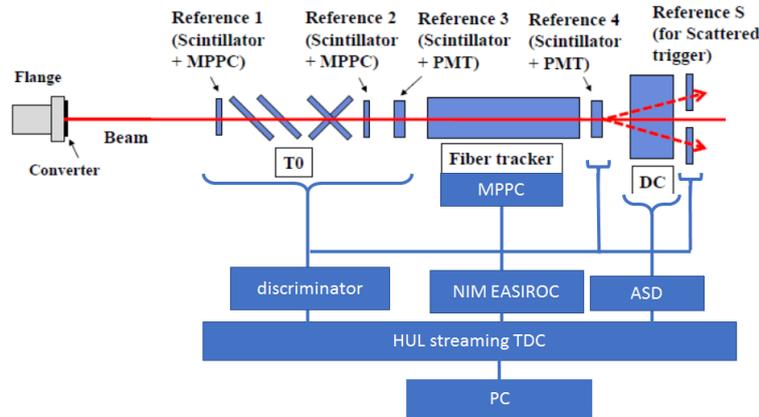


図 21: ELPH テスト実験のセットアップ BST リングから制動放射で得られた光子をフランジに取り付けたコンバーターで電子・陽電子対に変換し、それらを試作 BFT やシンチレーション検出器、ドリフトチェンバーで測定した。その測定で得られたアナログ信号は、MPPC からの信号は NIM EASIROC を用いて、ドリフトチェンバーからの信号は ASD を用いて、そして PMT からの信号はディスクリミネータを用いてそれぞれタイミング信号へ変換した。それらのタイミング信号は、HUL streaming TDC によって時間情報のデジタル信号化された。その後、SiTCP を通してパソコンに信号を転送し、データの保存を行った。

Hardware accelerator の性能の評価には fiber tracker からの信号を用い、その際のパラメーターとして以下の 3 つを用いた。

- Rate : Fiber1 本に対する、1 秒当たりのヒット数
- Gain : 光電子 1 個に対する MPPC の信号の波高
- V_{th} : MPPC の信号のしきい値が、光子何個分の電圧に対応しているかを示す値

このテスト実験では、5kHz/fiber、30kHz/fiber、300kHz/fiber、800kHz/fiber の 4 種類の rete の値と、40、30、25 の 3 種類の gain の値を用いて streaming DAQ による測定を行った。この時、 V_{th} は光子 3.5 個の値を用いた。Hardware accelerator の性能評価の際には、その中でも rate が 5kHz/fiber で gain が 40 のデータを用いて行った。

3.3 Time walk corrector の補正值の決定

Rate が 5kHz/fiber で V_{th} が光子 3.5 個分の値の時の各 Gain におけるデータを streaming DAQ を用いて測定し、その結果から time walk corrector の補正值 (単位 ch) を決定した。この時、X、U、V の 3 面につき 1 つの HUL を使っているため、補正值は各 HUL ごとに決定した。

3.4 Time walk によるコインシデンス窓幅の改善

Hardware accelerator の性能評価として、time walk corrector によるコインシデンス窓幅の変化を調べた。Time walk corrector を用いた時と用いていない時の測定結果から

TOF の 1 次元ヒストグラムを作成し、それぞれのピークをフィッティングしたところ、時間分解能 σ は time walk corrector 無しの時に $\sigma = 1.0970 \pm 0.0012\text{ns}$ 、time walk corrector 有りの時に $\sigma = 1.0650 \pm 0.0012\text{ns}$ となった。TOF の 1 次元ヒストグラムにおける time walk のテールを含む半分側の time gate を TOF のカウントがピークの値の $1/1000$ に減少するのに必要な範囲と定義して、その値が先ほど求めた σ の何倍になるか調べたところ、図 22、23 のようになった。図 22、23 を見ると、time walk corrector によって time gate が 30% 改善されることが確認できた。

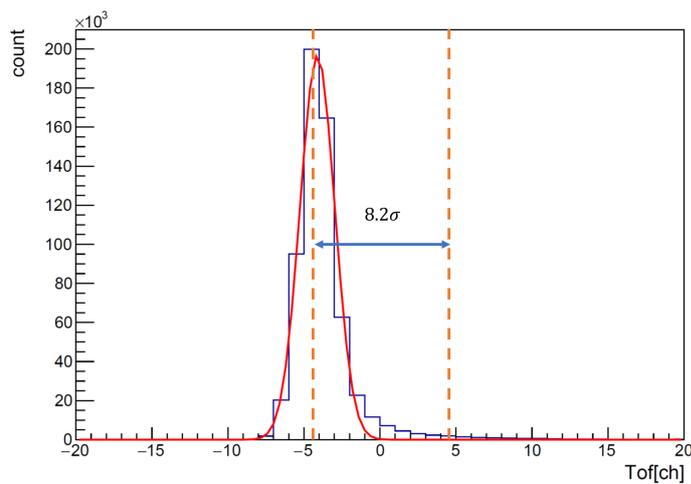


図 22: Time walk corrector なしの時の TOF 1次元ヒストグラム Time gate は 8.2σ である。

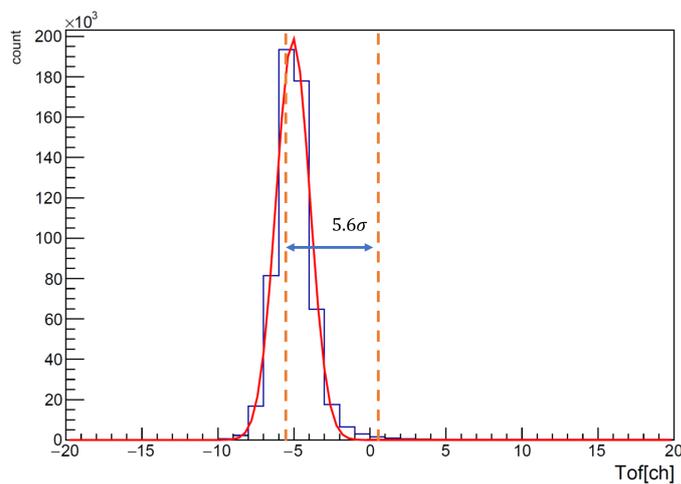


図 23: Time walk corrector ありの時の TOF 1次元ヒストグラム Time gate は 5.6σ である。

3.5 TOT filter の efficiency, cluster size への影響

TOT filter の有無による検出効率およびクラスターサイズの変化を調べた。この測定において用いる用語の定義について述べる。Hit cluster は、図 24 のように、同じ面内で隣り合ってヒットが検出されたファイバーの塊のことを指す。この hit cluster は、1 つ 1 つがその面に当たった粒子に対応していると考えられる。この hit cluster 1 つに含まれているファイバーの本数を cluster size と定義する。Cluster size は、試作 BFT の各面が 2 層俵積みになっていることより、ビームの粒子の通過に対してその値は主に 2 になると考えられる。そして、各面の efficiency を、他の 11 面の hit cluster 数が 1 つの時に、ある面に hit cluster が現れる確率として定義した。

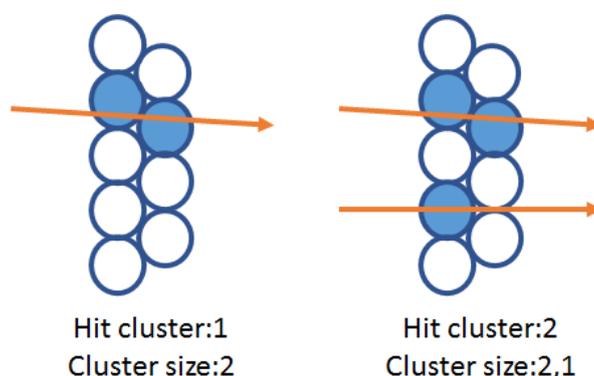


図 24: Hit cluster と cluster size の例 Hit cluster は、同じ面内で隣り合ってヒットが検出されたファイバーの塊のことを示し、この hit cluster 1 つに含まれているファイバーの本数を cluster size と定義する。

TOT filter を用いない場合と、TOT filter で TOT 値が 19.2 ns 以下の信号を破棄した場合、TOT 値が 28.8 ns 以下の信号を破棄した場合のそれぞれの場合について TOT の 1 次元ヒストグラムは、図 25 のようになった。これらのグラフを見ると、TOT filter で除去される信号は、測定された信号全体に比べて少数であることが確認できる。また、図 25(a) を見ると、ピークの左側の裾は、TOT 値が 40 以下の領域で減少が緩やかになっていることが確認できる。これは MPPC のダークカレントによるものであると思われる、TOT filter を用いた図 25(b)、25(c) では、その多くが除去されていることが確認できる。

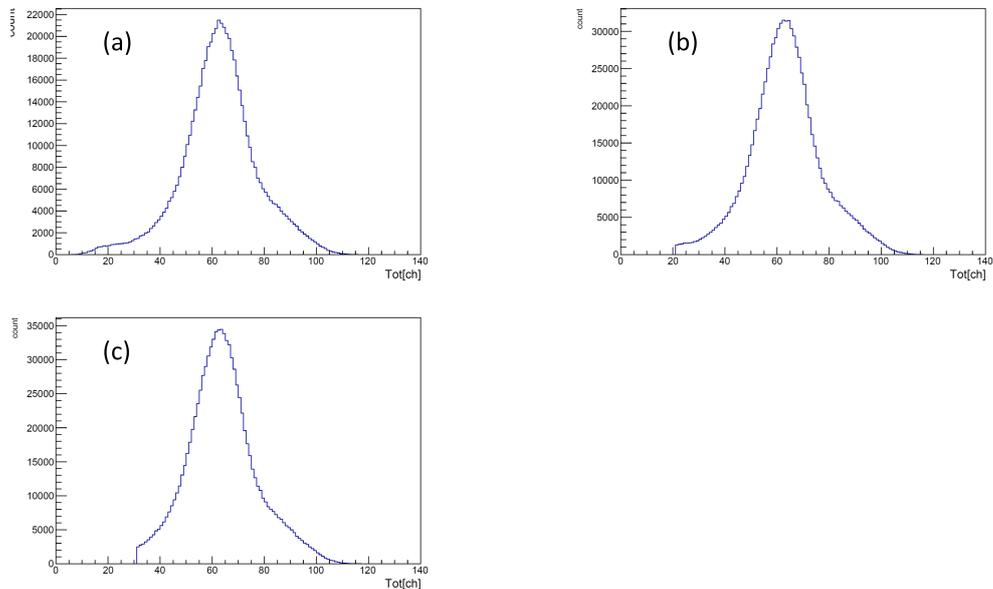


図 25: TOT の 1 次元ヒストグラム TOT filter 無しの時 (a)。TOT filter によって TOT 値が 19.2 ns の信号を破棄した時 (b)。TOT filter によって TOT 値が 28.8 ns の信号を破棄した時 (c)。

TOT filter の有無による efficiency の変化は、図 26 のようになった。グラフの横軸は、各面にビームの上流側から 1、2、3、……と順に降った面番号であり、縦軸は efficiency である。また、赤色のデータは TOT filter なしのデータを示し、緑色のデータは TOT filter によって TOT 値が 19.2 ns 以下の信号を破棄したデータを示し、青色のデータは TOT filter によって TOT 値が 28.8 ns 以下の信号を破棄したデータを示している。このグラフを見ると、3 つのデータは多くの場合誤差の範囲内で一致していることが確認できる。このことより、TOT filter による efficiency の悪化は無いと考えられる。

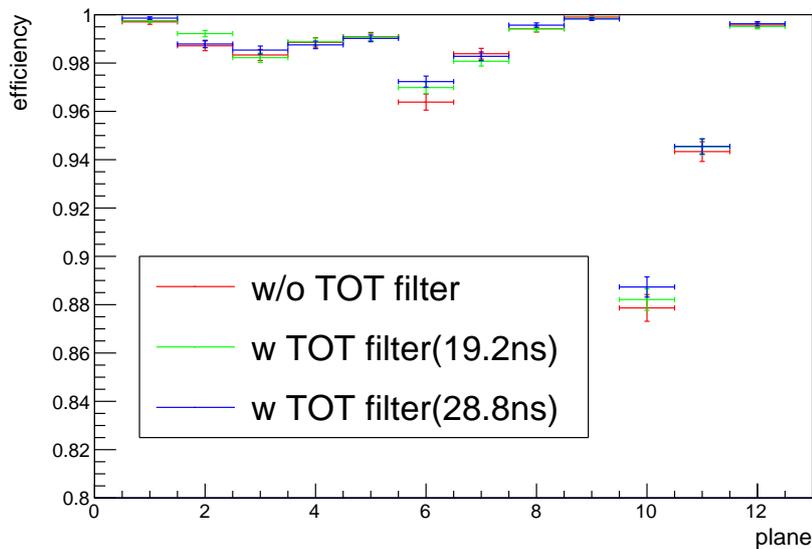


図 26: Plane efficiency の TOT filter 依存性 赤色のデータは TOT filter なしのデータを示し、緑色のデータは TOT filter によって TOT 値が 19.2ns 以下の信号を破棄したデータを示し、青色のデータは TOT filter のよって TOT 値が 28.8ns 以下の信号を破棄したデータを示している。

TOT filter の仕組みの部分で述べたように、TOT filter はノイズだけでなく粒子由来の信号も同時に破棄してしまう恐れがある。そのような信号では cluster size は基本的に 2 になるため、TOT filter が粒子由来の信号を破棄してしまうような場合は、cluster size 2 のイベントが減少すると考えられる。そのため、TOT filter が粒子由来の信号を破棄してしまっていないかを確認するために全ての面で hit cluster の数が 1 つのイベントを抽出し、cluster size が 1 と 2 のイベント数の比を求めた。Cluster size の分布は図 27(a)、27(b)、27(c) のようになった。これらの分布を見ると、TOT filter の有無で cluster size の分布にはほとんど差が見られないことが確認できる。また、cluster size が 1 と 2 のイベント数の比は、TOT filter 無しの際に 0.498、TOT 値が 19.2ns 以下の信号を破棄した時に 0.498、TOT 値が 28.8ns 以下の信号を破棄した時に 0.510 と、いずれの場合でも近い値になった。このことより、TOT filter が粒子由来の信号を破棄してしまっているという事は起きていないと考えられる。

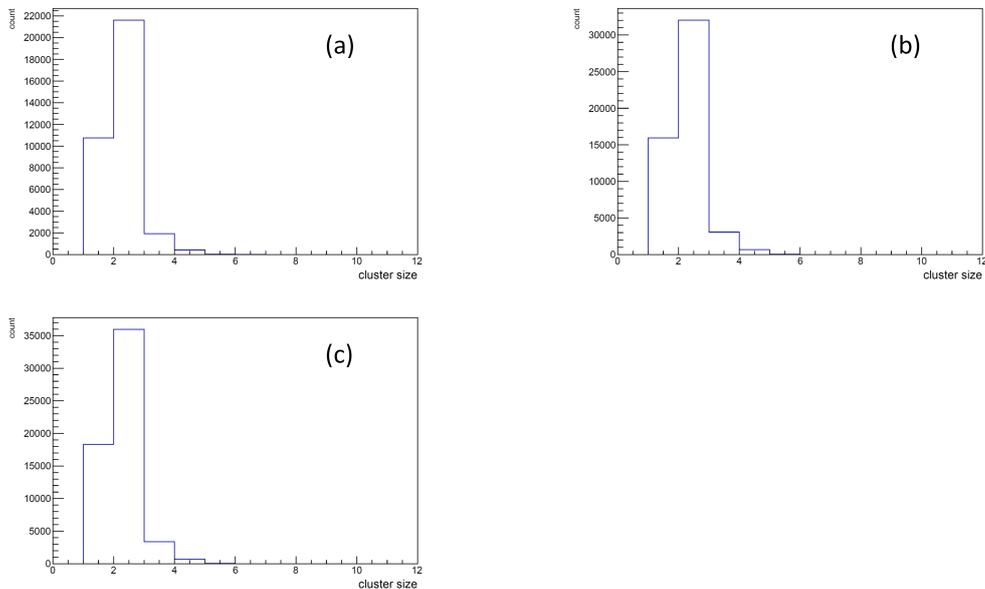


図 27: Cluster size の分布 TOT filter なしの時 (a)。TOT filter によって TOT 値が 19.2 ns 以下の信号を破棄した時 (b)。TOT filter のよって TOT 値が 28.8ns 以下の信号を破棄した時 (c)。

3.6 Time walk corrector, TOT filter の組み合わせ

Time walk corrector と TOT filter を組み合わせた場合を考える。Time walk corrector と TOT filter はどちらも検出器から得られた信号を FPGA 内で処理しているため、組み合わせた場合にデータの破壊といった予期せぬ動作を起こす可能性がある。そこで、time walk corrector と TOT filter を組み合わせた時のデータをそれらを個々に用いた際のデータと比較し、組み合わせた際の挙動を確認した。この時、TOT filter のカット条件として、TOT 値が 19.2ns 以下の信号を破棄する場合のみを用いた。

まず、この 2つの hardware accelerator を用いた時のコインシデンス窓幅の改善を調べる。Time walk corrector の際と同様に TOF の 1次元ヒストグラムをフィッティングしたところ、時間分解能は $\sigma = 1.0599 \pm 0.0011\text{ns}$ となった。この結果を用いて、TOF の 1次元ヒストグラムにおける time walk のテールを含む半分側の time gate が σ の何倍になるかを調べたところ、図 28 のようになった。この結果を図 22 と比較すると、time walk corrector を用いた時と同様に、hardware accelerator によって time gate が 70% 程度になっていることが確認できた。

次に、hardware accelerator を両方用いた時の efficiency を調べたところ、図 29 のようになった。グラフの縦軸と横軸の取り方は図 26 と同じである。赤色のデータは hardware accelerator なしのデータを示し、緑色のデータは hardware accelerator ありのデータをそれぞれ示している。これらのグラフを見ると、TOT filter のみの時と同様にデータは誤差の範囲内で一致しており、hardware accelerator による efficiency の悪化は無いと考えられる。

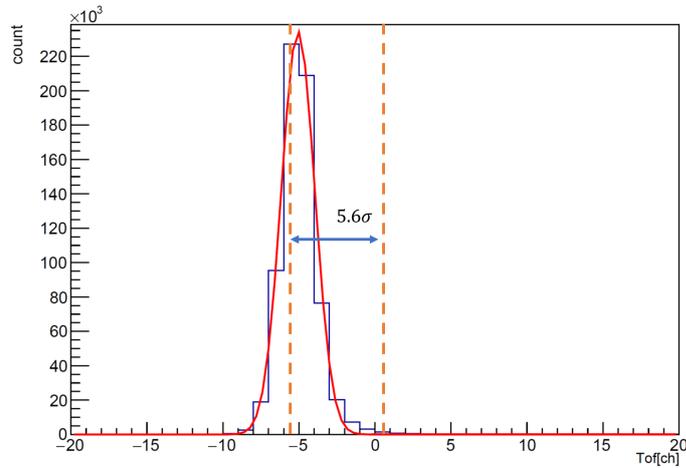


図 28: Hardware accelerator ありの時の TOF の 1次元ヒストグラム Time gate は 5.6σ である。

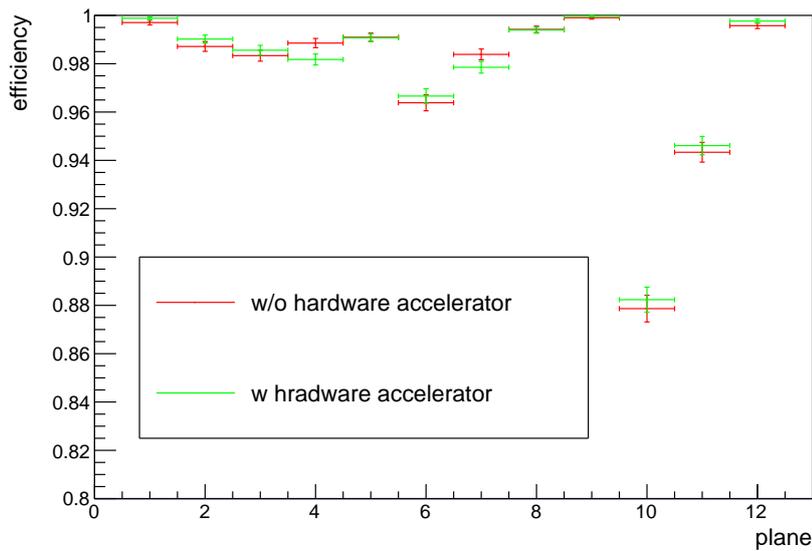


図 29: Plane efficiency の hardware accelerator 依存性 赤色のデータは hardware accelerator なしのデータを示し、緑色のデータは hardware accelerator ありのデータをそれぞれ示している。

最後に、hardware accelerator を両方用いた時の cluster size の分布を確認し、cluster size が 1 と 2 のイベント数の比を求めたところ、cluster size の分布は図 30 のようになり、cluster size が 1 と 2 のイベント数の比は 0.509 となった。この分布を図 27(a) と比較すると、TOT filter のみの時と同様に、hardware accelerator の有無で cluster size の分布にはほとんど差が見られなかった。また、cluster size が 1 と 2 のイベント数の比も、TOT filter のみを用いた時の値に近い値になっていることが確認できた。これらのことから、hardware accelerator が粒子由来の信号を破棄してしまっているという事は起きていない

と考えられる。

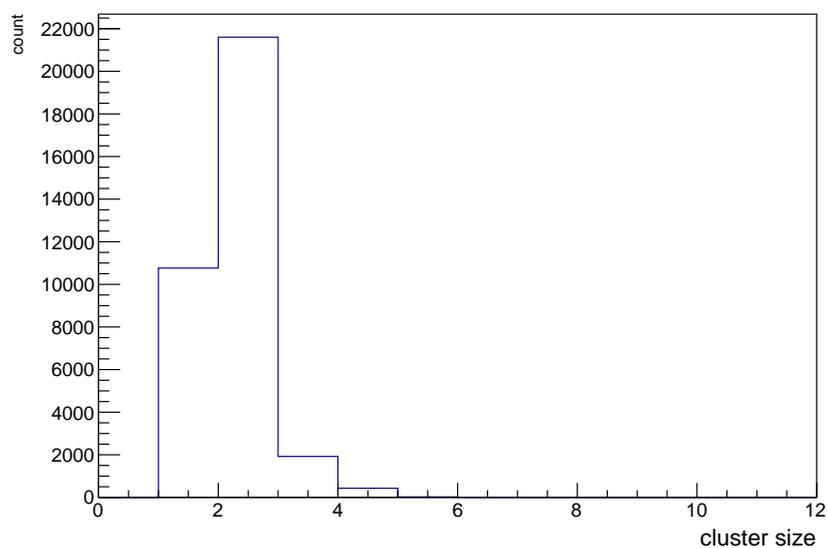


図 30: Hardware accelerator を両方用いたの時の cluster size の分布 図 27 と同様に、cluster size が 2 のイベント数が最も多く、次にイベント数が多いのが cluster size が 1 のイベントになっている。

以上のことより、time walk corrector と TOT filter を組み合わせても、それぞれを個別に用いた時と結果が変わらず、組み合わせることによる悪影響はないことがわかった。

4 まとめ

現在、 ΛN 相互作用を高い精度で理解するために、J-PARC 高運動量ビームラインにおいて高統計な Λp 散乱実験を計画している。この散乱実験では高運動量・大強度のビームを用いるため高レート・多種多様なイベントが観測され、既存のトリガシステムではイベントを測定しきれない。そこで、全てのヒット情報をデータストリーミングする streaming DAQ system の導入を計画している。Streaming DAQ は、検出器信号から時間情報の取得と TOT の計算を行い、データのマーキングと heart beat unit による信号の同期がなされた後に、コンピュータに信号が送られる構造になっている。本研究では、その streaming DAQ system において、CPU への負荷を減らすためにマーキングを行う unit の前に設置される hardware accelerator の 1 つである time walk corrector を設計した。それによってコインシデンス窓幅が改善されるか、それを他の hardware accelerator である TOT filter と組み合わせた際に信号に予期せぬ悪影響を与えないかを評価した。

β 線源を用いた測定では、試作 BFT の TDC と TOT の相関に現れる time walk を確認することができた。また、この結果から、time walk corrector における TOT 分割を決定した。

ELPH で行ったテスト実験の結果から、time walk corrector によってコインシデンス窓幅が改善されることが確認できた。また、TOT filter による efficiency, cluster size への悪影響は見られないことも確認できた。そして、time walk corrector と TOT filter を組み合わせてもデータに悪影響はなく、個々に用いた時と同様の結果が得られることも確認できた。これらのことから、streaming DAQ system において time walk corrector 及び TOT filter は有効であると考えられる。

今後の課題として、TOT filter によってどの程度ノイズが除去できているかの調査が必要である。また、図 26,29 を見ると、一部の面で efficiency が低下していることが確認できるため、この原因の調査を飛跡の tracking を用いて行うことも考えている。

また、本研究では hardware accelerator として time walk corrector と TOT filter を用いたが、これらの hardware accelerator がいかなる場合においても、そして、どのような検出器に対しても最適な hardware accelerator となるとは限らない。そこで、試作 BFT とドリフトチェンバーのデータをもとに、より適したフィルターを探していきたいと考えている。

5 謝辞

本研究におきまして、多くの方のご指導・ご助力をいただきました。深く感謝いたします。

指導教官である本多良太郎助教には、FPGA について何もわからない私に、電子回路の基本的なところから丁寧にご指導いただきました。研究に行き詰った際も、今後の指針を示していただきました。厚く感謝を申し上げます。

そのほかにも、田村博和教授、中村哲教授、三輪浩二准教授、金田雅司助教、永尾翔助教には、ゼミやミーティング、卒論発表の場で様々なアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

同研究グループの先輩である荒巻昂氏には、fiber tracker の動かし方から解析用のマクロの作成に至るまで、非常に多くのアドバイスと助力をいただきました。ありがとうございました。

ELPH で行ったテスト実験に関しましては、未熟な私を実験に参加させてくださった野海博之教授、石川貴嗣助教、白鳥昂太郎助教、浅野秀光氏、赤石貴也氏、五十嵐洋一氏、佐甲博之氏、高橋智則氏、C.-Y. Chang 氏、W.-C. Chang 氏、永井慧氏、Y. Ma 氏に厚く感謝を申し上げます。

最後に、ここに書ききることのできなかつた方々を含めて、卒業研究に関わっていただいたすべての方々に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Hideki Yukawa(1935). Nippon Sugaku-Buturigakkwai Kizi Dai 3 Ki, 17, 48-57
- [2] Particle Data Group, Review of Particle Properties
- [3] G. Alexander et al., Phys. Rev. 173 (1968) 1452-1760
- [4] B. Sechi-Zorn et al., Phys. Rev. 175 (1968) 1735-1740
- [5] J. A. Kadyk et al., Nucl. Phys. B 27 (1971) 13-22
- [6] 浜松ホトニクス技術資料 (2013) 「光半導体素子ハンドブック 第03章 Si APD、MPPC」
<https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf>(2019年2月7日アクセス)
- [7] 松本祐樹 修士論文 「J-PARC 大強度ビームトラッキング用ファイバー検出器の開発」